

УДК 621.878

Щукин А. В.

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАНЕСЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ НОЖЕЙ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Для определения рациональных параметров ионно-плазменного покрытия, наносимого на поверхность рабочего органа землеройно-транспортной машины и обеспечивающего минимальный их износ, нами была использована теории планирования эксперимента [1].

Как известно, для хорошей адгезии покрытия к основному металлу важно не только состав наносимого покрытия, но и шероховатость и твердость материала поверхности, на которую наносится покрытие, а также его толщина. Именно величины этих параметров выбираются рациональными.

Нами для исследований в качестве примера оптимизации был выбран автогрейдер, рабочий орган которого (нож) изготавливается из стали 65Г.

Выбор в качестве одного из параметров твердости связан с тем, что она относительно легко поддается определению в любой точке ножа автогрейдера без нанесения ущерба как до, так и после эксплуатации.

Как показали результаты проведенных исследований [2], значение шероховатости поверхности, на которую наносится покрытие, должно быть не менее 0,16 Ra. В противном случае наносимое покрытие вследствие плохой адгезии с подложкой постепенно отслаивается. В этой связи одной из главных задач являлось определение рациональной шероховатости обрабатываемой поверхности, которая обеспечивала бы наилучшую адгезию покрытия с основным металлом.

Целью данной работы является определение рациональных параметров ионно-плазменного покрытия, при которых износ режущего элемента (ножа) автогрейдера был минимален.

Исследование зависимости износостойкости от параметров ионно-плазменного покрытия.

Варьировали толщиной наносимого покрытия в пределах от 3 до 7 микрон, поскольку толщина от 3 до 6 микрон обеспечивает наилучшие адгезионные связи с основным металлом, менее 3 микрон – не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства изделия [2]. Покрытие толщиной более 6 микрон обладает недостаточной адгезией, что в конечном итоге, приводит к отслаиванию с подложкой.

Имея ввиду, что значение твердости может быть только целым числом, было принято решение провести четыре серии экспериментов, соответственно задавая значения твердости 40, 45, 50, 55.

Исходя из сути теории математического планирования эксперимента [3–5], в качестве варьируемого фактора принимали толщину покрытия и шероховатость, которую обозначили, соответственно,  $X_1$  и  $X_2$ . При этом функцией отклика являлся износ, который был нами обозначен, как  $Y$ .

Таким образом, опираясь на вышеизложенные соображения, принимали, что границами существования (изменения) факторов будет  $X_{1\min}=3$ ;  $X_{2\max}=7$ ;  $X_{2\min}=0,16$ ;  $X_{2\max}=0,48$ . Тогда интервалы варьирования факторов соответственно будут:

$$\Delta X_1 = X_{2\max} - X_{1\min} = 4;$$

$$\Delta X_2 = X_{2\max} - X_{2\min} = 0,32.$$

В первую очередь, был проведен факторный эксперимент первого порядка. Целью данного эксперимента было изыскание математической модели зависимости  $Y$  от  $X_1$ ,  $X_2$ , которая была бы представлена в виде линейного полинома. Для достижения поставленной цели для каждого значения твердости был реализован полный факторный эксперимент типа  $2^n$ . Результаты этого эксперимента приведены в табл. 1–4.

Таблиця 1

Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 40 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	Y
1	3	0,16	0,3540
2	3	0,48	0,6723
3	7	0,16	0,7012
4	7	0,48	0,6822

Таблиця 2

Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 45 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	Y
1	3	0,16	0,2421
2	3	0,48	0,6253
3	7	0,16	0,6643
4	7	0,48	0,6211

Таблиця 3

Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 50 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	Y
1	3	0,16	0,2632
2	3	0,48	0,6133
3	7	0,16	0,6311
4	7	0,48	0,5722

Таблиця 4

Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 55 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	Y
1	3	0,16	0,2332
2	3	0,48	0,6318
3	7	0,16	0,6511
4	7	0,48	0,5987

Примечание: по каждой строке планов табл. 1–4 проводилось два износных испытания ножей автогрейдера на специальном лабораторном стенде [6, 7]. При этом в таблицы в качестве значения Y записывались средние значения.

Далее для всех табл. 1–4 рассчитывалось уравнение регрессии:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (1)$$

Результаты расчета его коэффициентов представлены в табл. 5.

Таблиця 5

Значение коэффициентов регрессии

Значение твердости	$b_0$	$b_1$	$b_2$
40	0,230	0,045	0,468
45	0,107	0,052	0,531
50	0,170	0,041	0,455
55	0,114	0,048	0,543

По критерию Фишера была проведена проверка адекватности полученных уравнений путем сравнения расчетного критерия Фишера  $F_p$  с табличным  $F_T$  при уровне значимости  $q = 0,05$ . В связи с тем, что во всех рассмотренных случаях  $F_p > F_T$ , можно сделать вывод о том, что уравнения не являются адекватными. В конечном итоге было принято решение продолжить эксперименты. При этом полученные планы  $2^n$  были дополнены до центральных композиционных планов второго порядка.

Далее было рассчитано уравнение регрессии:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{22}X_2^2. \quad (2)$$

Результаты расчета коэффициентов регрессии приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения коэффициентов линейного уравнения регрессии

Значение твердости	Значение коэффициентов регрессии					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{22}$
40	0,806	-0,169	-1,493	0,032	-0,264	4,917
45	0,108	-0,155	2,715	-0,033	-0,333	-0,779
50	0,868	-0,202	-2,068	0,037	-0,320	6,137
55	0,172	-0,170	2,239	0,035	-0,352	0,116

Для каждого значения твердости подложки на рис. 1–4 показано графическое изображение поверхности отклика.

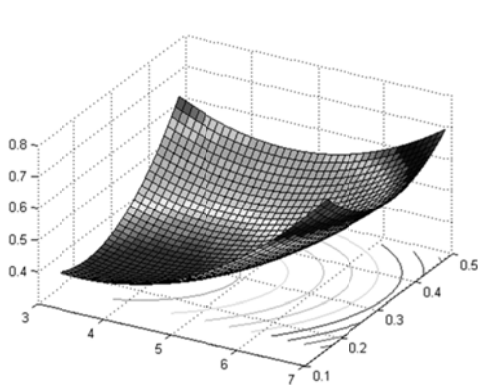


Рис. 1. Поверхность отклика для твердости 40 HRC

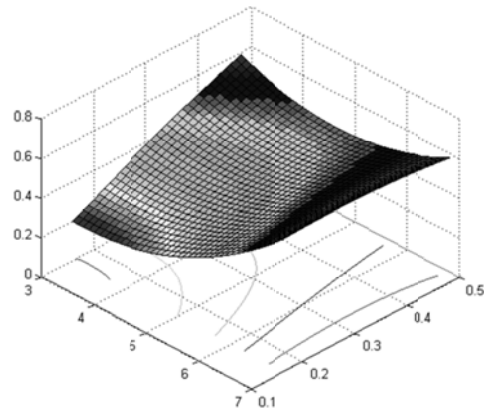


Рис. 2. Поверхность отклика для твердости 45 HRC

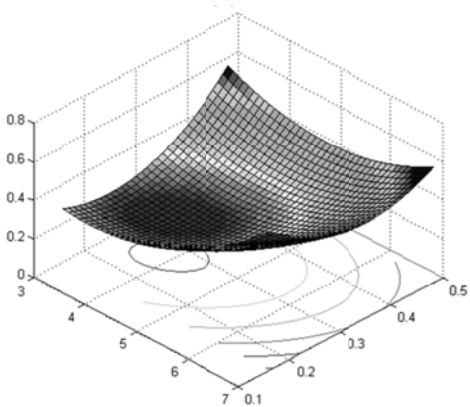


Рис. 3. Поверхность отклика для твердости 50 HRC

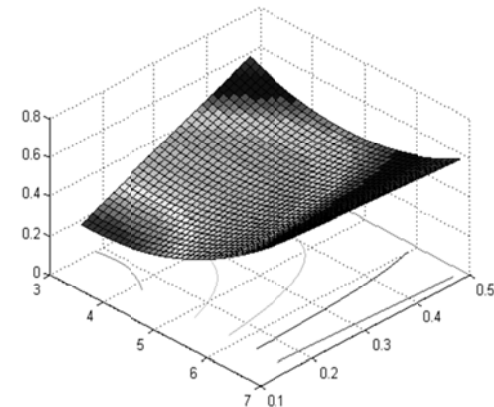


Рис. 4. Поверхность отклика для твердости 55 HRC

Далее определяли наименьшее значение функции  $Y$  в области:

$$\begin{cases} 3 \leq X_1 \leq 7 \\ 0,16 \leq X_2 \leq 0,48 \end{cases} \quad (3)$$

Как известно из [5], это значение может быть принято или на границе области, или в стационарной точке. При этом координаты  $(X_1^0, X_2^0)$  стационарной точки определяли в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0 \end{cases},$$

Данная система уравнений в нашем случае имеет вид:

$$\begin{cases} b_1 + b_{12}X_2 + 2b_{11}X_1 = 0 \\ b_2 + b_{12}X_1 + 2b_{22}X_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Решаем приведенную выше систему уравнений (4) по формулам

$$X_1^0 = \frac{-2b_{22}b_1 + b_2b_{12}}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2},$$

$$X_2^0 = \frac{-2b_{11}b_2 + b_{12}b_1}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2},$$

Полученные значения координат стационарной точки приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения координат стационарной точки

Значение твердости	Координаты стационарной точки	
	$X_1^0$	$X_2^0$
$T$		
40	3,689	0,251
45	5,38	0,592
50	3,947	0,271
55	6,947	0,9

Как видно из представленной таблицы, только в двух случаях (при  $T = 40$  и  $T = 45$ ) стационарные точки ( $X_1^0 = 3,69$ ;  $X_2^0 = 0,25$  и  $X_1^0 = 3,95$ ;  $X_2^0 = 0,27$ ) принадлежат области определения факторов. В остальных же случаях наименьшее значение функции  $Y$  наблюдается на границе (3). Подставив все необходимые значения и решив уравнение регрессии (2), определили наименьшее значение функции в каждом случае. Координаты экстремальной точки и значение  $Y$  приведены в табл. 8.

Как видно из данной таблицы, наименьшее значение износа прогнозируется при твердости, равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости 0,27 мкм. Однако, поскольку ближайшие значения шероховатости возможны лишь 0,16 и 0,32 мкм, проводилось два дополнительных эксперимента, результаты которых приведены в табл. 9.

Таблица 8

## Значения отклика в экстремальной точке

Значение твердости	Координаты экстремальной точки		Значение отклика
	$X_1$	$X_2$	
40	3,7	0,25	0,307
50	4,0	0,27	0,189

Таблица 9

## Толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 50 HRC

Значение твердости	Значение параметров		Значение износа
	$X_1$	$X_2$	
50	4,0	0,16	0,175
	4,0	0,32	0,148

Как видно из табл. 9, значения параметров, полученных с помощью теории планирования, действительно являются рациональными. При этом наименьшее значение износа было получено при твердости равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости 0,32 мкм.

Таким образом, результаты, проведенного эксперимента износа ножей автогрейдера с ионно-плазменным покрытием при различных значениях твердости материала подложки, шероховатости поверхности и толщины покрытия, подтверждают достоверность расчетов, полученных с помощью теории планирования эксперимента.

## ВЫВОДЫ

Для определения рациональных значений параметров наносимого покрытия на поверхность режущих элементов была применена теория планирования эксперимента. При этом в качестве параметров оптимизации были приняты твердость, шероховатость подложки и толщина наносимого покрытия.

При значении твердости, равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости подложки 0,32 мкм износ режущих элементов рабочих органов автогрейдера минимален.

Используя предлагаемую выше теорию планирования экспериментов, можно определить рациональные параметры ионно-плазменного покрытия для любых других рабочих органов землеройно-транспортных машин.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс. – М. : Мир, 1997. – 406 с.
2. Роик Т. А. Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей объемного гидропривода нанесением ионно-плазменных покрытий: монография / Т. А. Роик, Д. Б. Глушкова, Ю. В. Рыжков. – Харьков : 2012. – 112 с.
3. Евдокимов Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М. : Наука, 1999. – 225 с.
4. Решение задач тепловой динамики и моделирование трения и износа // Наука – М., 2000. – 215 с.
5. Гегузин Я. Е. О природе схватывания твердых тел / Я. Е. Гегузин, И. В. Красильский, Л. Н. Парицкая. – М. : Наука, 1978. – С. 17–21.
6. Щукин А. В. Закономерность изнашивания рабочих органов землеройно-транспортных машин / А. В. Щукин // Сб. науч. тр. : Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Подъемно – транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – Дн – ск : ВГУЗ ПГАСА, 2012. – Вып.66 – С. 224–227.
7. Щукин А. В. Снижение износа режущих элементов землеройно-транспортных машин / А. В. Щукин // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер. : Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ВГУЗ ПГАСА, 2013. – Вып.72. – С. 284–290.